第 37 卷第 6 期 生 态 学 报 Vol.37,No.6
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510182101
钱多,查天山,吴斌,贾昕,秦树高.毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析.生态学报,2017,37(6):1966-1974.
Qian D, Zha T S, Wu B, Jia X, Qin S G. Spatio-temporal distribution characteristics of reference crop evapotranspiration in the Mu Us desert. Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):1966-1974.

毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析

钱 多[1],查天山[1,2,*],吴 斌[1,2],贾 昕[1,2],秦树高[1,2]
1 北京林业大学水土保持学院, 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083
2 北京林业大学, 国家林业局水土保持重点实验室, 北京 100083

摘要:根据毛乌素沙地典型站点近 60 年(1955—2014 年)逐日气象数据,利用 Penman-Monteith 公式计算毛乌素沙地各气象站点参考作物蒸散量(reference crop evapotranspiration, ET_0)及研究区域内整体 ET_0。Mann-Kendall 趋势检验法和 ArcGIS 的协同克里格插值法用于分析 ET_0时空变化特征,同时,利用敏感性分析方法对 ET_0的变化成因进行分析。结果表明:(1)近 60 年毛乌素沙地 ET_0多年平均值为 1048.81mm,年际变化呈现缓慢上升趋势。年内变化夏季最高,冬季最低。区域内 ET_0空间分布整体呈现自西向东递减趋势。(2)ET_0年变化对风速的敏感程度最大,日照时数和气温次之,相对湿度最小。春、秋两季 ET_0变化对日照时数最为敏感;夏、冬两季 ET_0变化对相对湿度最为敏感。空间分布上,毛乌素沙地东南部地区为气温敏感系数高值区,西北部地区为相对湿度和日照时数敏感系数高值区,南部为风速敏感系数高值区。(3)通过计算气象因子对 ET_0变化的贡献量得出,气温是影响毛乌素沙地 ET_0年变化的主导因子。夏季 ET_0变化的主导因子是风速;春、秋、冬三季主导因子是气温。空间分布上,毛乌素沙地西南部地区 ET_0变化的主导因子为风速,东部地区主导因子为气温。

关键词:协同克里格插值法;毛乌素沙地;敏感性分析;Penman-Monteith 公式;Mann-Kendall 趋势检验法

Spatio-temporal distribution characteristics of reference crop evapotranspiration in the Mu Us desert

QIAN Duo[1], ZHA Tianshan[1,2,*], WU Bin[1,2], JIA Xin[1,2], QIN Shugao[1,2]
1 *Yanchi Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*
2 *Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*

Abstract: Reference crop evapotranspiration (ET_0) is often used to evaluate the capacity of atmospheric evaporation in the terrestrial hydrology cycle. Simulations with climate models and atmospheric general circulation models have shown that changes in meteorological factors affect ET_0. The Mu Us desert is located in the arid and semi-arid region of northwest China, which experiences severe water shortages. To better understand the ET_0 spatio-temporal distribution characteristics in the Mu Us desert, the Penman-Monteith equation recommended by the FAO in 1998 was used to calculate ET_0 at typical meteorological stations, as well as the overall Mu Us desert ET_0, based on 60 years of daily meteorological data (1955—2014). A Mann-Kendall trend test was used to determine the ET_0 spatio-temporal distribution characteristics. Furthermore, a Co-Kriging interpolation was used to draw ET_0 maps, which presented a clear spatial distribution of ET_0 in the Mu Us desert. In addition, a sensitivity analysis was used to analyze the causes of ET_0 change. Annual average ET_0 was 1048.81 mm for the past 60 years. There was a slight increasing trend in the inter-annual variation. The trend of annual ET_0 showed a single peak curve, with the highest value in June (5.77 mm/d), and the lowest value was in January (0.54 mm/d). The

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31270755, 31361130340);国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429901); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD16B02)

收稿日期:2015-10-18; **网络出版日期**:2016-08-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tianshanzha@ bjfu.edu.cn

average summer ET_0 was 5.23 mm/d, and average winter ET_0 was 0.70 mm/d. Spatially, ET_0 decreased gradually from west to east, ranging from 1058.53 to 1103.85 mm in the west, and from 1014.05 to 1043.44 mm in the east. The sensitivity analysis indicated that ET_0 was positively related to wind speed, air temperature, and solar duration, but negatively related to relative humidity. Furthermore, ET_0 was most sensitive to changes in wind speed, then solar duration, air temperature, and relative humidity, respectively. Seasonally, ET_0 was more sensitive to solar duration in spring and autumn, but more sensitive to relative humidity in summer and winter. Wind speed was the dominant controlling factor on ET_0 in summer, but in spring, autumn and winter, it was air temperature. Overall, air temperature was the dominant controlling factor on annual ET_0 in Mu Us desert. Spatially, ET_0 was more sensitive to temperature in the southeast region of the Mu Us desert, to relative humidity and solar duration in the northwest region, and to wind speed in the south. The spatial distribution of ET_0's dominant controlling factor was different from its sensitive coefficient. Wind speed was the dominant controlling factor on ET_0 distribution in southwest of Mu Us desert, and air temperature in east. The meteorological factors here were considered dominant in controlling the spatio-temporal variations of the Mu Us desert ET_0. However, advection variation caused by wind speed, temperature and relative humidity, inter-annual variation of the atmospheric circulation, surface uniformity, and human activities, also influence ET_0 in China's arid and semi-arid region. Therefore, the results presented here only reflect the meteorological variables that were included in the analyses. More comprehensive hydrological studies are therefore required in the future.

Key Words: Co-Kriging interpolation; Mu Us desert; sensitivity analysis; Penman-Monteith equation; Mann-Kendall trend test

参考作物蒸散量(reference crop evapotranspiration, ET_0)作为水文循环过程的重要参数,能够为评价气候干旱程度、估算作物需水量、生产潜力以及水资源供需平衡等提供依据[1-2],是农业生产中实现合理调配水土资源及缓解水资源亏缺的重要参考值。气候模式和大气环流模式的数值试验表明,气候因素的变动将直接影响 ET_0的变化[3-5]。在气候变化背景下,气温、相对湿度、太阳辐射等气象因子的波动都将导致 ET_0不同程度的变化。因此,分析 ET_0的变化特征及其变化成因,有助于深入理解区域水循环对气候变化的响应机制。

关于 ET_0的研究在全球范围内已广泛开展,北半球太阳辐射减少,南半球云量、气溶胶浓度增加均被认为是全球 ET_0减少的主要原因[6-8]。同时,不同地区 ET_0变化对气象因子的响应程度有所差异,湿润半湿润地区 ET_0变化与太阳辐射关系密切,而风速、温度和相对湿度对干旱半干旱地区 ET_0变化作用更为显著[9-11]。过去数十年中国 ET_0总体呈下降趋势[12-14],但东北地区、松嫩平原西部和黄河上游 ET_0又呈微弱上升趋势[15-17],西北地区 ET_0研究结果差异较大,乌鲁木齐河流域及黄土高原以西地区 ET_0呈现下降趋势,但是西辽河流域及黄土高原以东 ET_0呈现上升趋势[18-20]。由于 ET_0的变化受到气象要素、地形、植被、研究区域和时段等多因素共同影响,所以局地的 ET_0变化可能不同,不同研究结果存在偏差。现有研究表明,ET_0的变化特征及其主导因子具有明显的区域性差异。基于 1957—2012 年全国气象资料分析得出气温是影响中国 ET_0的主要因子[21],而西北地区,华北平原和川中丘陵 ET_0变化的主要归因于风速和日照时数[22-24]。

毛乌素沙地是中国四大沙地之一,位于中国西北部,行政区地跨内蒙古自治区、陕西省和宁夏回族自治区,降水波动性大,旱季年份居多,水资源短缺是限制毛乌素沙地生态环境恢复和农业生产潜力的重要因素[25-26]。随着全球气候变化程度加剧,毛乌素沙地气候呈现暖干化趋势,ET_0也随之发生变化[27-28],但该地区 ET_0变化的主导因子尚不明确。本文基于毛乌素沙地典型气象站点 1955—2014 年气象资料,利用 Penman-Monteith 公式计算毛乌素沙地 ET_0,通过 Mann-Kendall 趋势检验法和 ArcGis 的协同克里格插值法,探究毛乌素沙地近 60 年 ET_0时空变化特征,并且利用敏感性分析法定量分析各气象因子对 ET_0的影响作用。研究结果有助于深入理解本区域内气候变化对水循环的影响,同时为该区农业生产中水土资源的合理配置提供指导。

1 研究区概况

毛乌素沙地位于中国西北部干旱半干旱地区,地理位置介于 37°30— 39°20′N 和 107°20′— 111°30′E 之间, 包括内蒙古自治区鄂尔多斯南部,陕西省榆林地区北部,以及宁夏回族自治区盐池县东北部,沙地面积约 4 万 km^2。本区域是鄂尔多斯高原向陕北高原过渡地带,地势呈现由西北向东南倾斜,属于温带季风区,年平均气温为 6.10— 8.15 ℃,降水量呈波动性变化。区域内自然环境恶劣,生态和人口的双重压力严重影响当地农业生产和社会经济发展。

2 研究方法

2.1 数据来源

本文选取毛乌素沙地内部和周边 8 个气象台站气象资料,其中,内蒙古自治区 3 个(鄂尔多斯市、鄂托克旗和伊金霍洛旗),陕西省 4 个(定边县、横山县、榆林市和靖边县),宁夏回族回族自治区 1 个(盐池县),靖边县站气象资料由于年代序列较短,仅用于分析毛乌素沙地参考作物蒸散量空间分布特征。气象资料来源于国家气象信息中心(http://www.escience.gov.cn/),为 1955—2014 年逐日气象变量,包括最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数。采用气象学标准进行季节划分,即春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12—次年 2 月。

2.2 Penman-Monteith 公式计算

本文中参考作物蒸散量(ET_0,也称潜在蒸散量)计算采用世界粮农组织(FAO)推荐并修订的 Penman-Monteith 公式。表达式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \dfrac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中,ET_0为参考作物蒸散量(mm/d);R_n为参考作物冠层表面净辐射量(MJ (m^{-2} d^{-1});G 为土壤热通量(MJ m^{-2} d^{-1});T 为平均气温(℃);e_s为饱和水汽压 (kPa);e_a为实际水汽压(kPa);Δ 为水汽压对温度的斜率(kPa/℃);γ 为干湿球常数(kPa/℃);U_2为距地面 2m 高处风速(m/s)。

Penman-Monteith 公式中辐射项采用经辐射校正的 FAO56-PM 模型计算[29],表达式为:

$$R_n = (1 - \alpha)\left(0.2 + 0.79\frac{n}{N}\right)R_{s\ a} - \sigma\left[\frac{T^4_{\max,k} + T^4_{\min,k}}{2}\right](0.56 - 0.25\sqrt{e_a})\left(0.9\frac{n}{N} + 0.1\right) \quad (2)$$

式中,σ 为波尔兹曼常数[4.903×10^{-9}MJ/(K^4 m^2 d)];R_{sa}为晴天辐射(MJ m^{-2} d^{-1});n 为实际日照时数(h),N 为可照时数(h),α 为地表反射度,取值 0.23。

2.3 气象因子敏感性分析

参考作物蒸散量对气象因子的敏感系数计算[30],即通过计算 ET_0对各气象因子变量的偏导数,将气象因子对 ET_0的变化无量纲化,定量表达 ET_0对单个气象因子的敏感性。表达式为:

$$S_{vi} = \lim_{\Delta vi \to 0}\left(\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta vi / vi}\right) = \frac{\partial ET_0}{\partial vi}\frac{vi}{ET_0} \quad (3)$$

式中,S_{vi}为 ET_0对气象因子变量的敏感系数,无量纲;vi 为第 i 个气象因子变量,本文包括平均风速、平均气温、平均相对湿度和日照时数。S_{vi}的正负反映 ET_0变化与气象因子变化的一致性,S_{vi}为正值表明 ET_0随该气象因子的增加而增加;S_{vi}绝对值大小反映 ET_0的变化对相应气象因子变化的敏感程度,绝对值大表明 ET_0对该气象因子变化的敏感性大。

气象因子对 ET_0变化的贡献量计算[31],即将单个气象因子的敏感系数与该因子的多年相对变化率相乘,贡献量最大的气象因子为引起 ET_0变化的主导因子。表达式为:

$$\mathrm{Con}_{vi} = S_{vi}\,RC_{vi} \tag{4}$$

$$RC_{vi} = \frac{60\ \mathrm{Trend}}{|av|} \times 100\% \tag{5}$$

式中,Con_{vi}为气象因子 vi 对 ET_0变化的贡献量;RC_{vi}为 vi 的多年相对变化率;av 为 60 年 vi 的平均值;Trend 为逐年变化率,由趋势分析法计算获得。

2.4　插值方法

本研究采用 ArcGIS 软件中协同克里格插值方法(Co-Kriging Interpolation),地理数据选用空间分辨率为 90 m×90 m 的毛乌素沙地数字高程模型(SRTM3 DEM)数据,将其作为地形因子参数(协变量)对研究区 ET_0及其对气象因子的敏感系数进行空间插值。插值计算中协变异函数表达式为:

$$\gamma_{ij}(h) = \frac{1}{2N'(h)} \sum_{i'=1}^{N'(h)} [Z_i(x_{i'}) - Z_i(x_{i'} + h)]\,[Z_j(x_{i'}) - Z_j(x_{i'} + h)] \tag{6}$$

式中,$\gamma_{ij}(h)$为协变异函数;$N'(h)$为分离距离 h 的 $Z_i(x)$和 $Z_j(x)$的样本对数;

协同克里格法的插值表达式为:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{m} \lambda_{1i} z_1(x_i) + \sum_{j=1}^{q} \lambda_{2j} z_2(x_j) \tag{7}$$

式中,$z^*(x_0)$为 x_0处预测变量的估算值;$z_1(x_i)$为预测变量的测量值;$z_2(x_j)$为协变量的测量值;λ_{1i},λ_{2j}为分别为 z_1和 z_2的权重;m,q 为分别为预测变量和协变量测量点数量。

对空间插值结果的精度和误差采用 t 检验方法进行统计分析,P 值大于 0.05,未达到显著差异水平,表明插值估算结果与实测值不存在显著差异,协同克里格插值结果可信。

2.5　数据分析

本文利用 Matlab (R2012b) 统计软件,应用 Mann-Kendall 趋势检验法对 ET_0和气象因子变化趋势进行显著性检验;应用敏感性分析方法量化分析主要气象因子(平均风速、平均气温、相对湿度和日照时数)对 ET_0变化的影响程度及其贡献量;应用协同克里格插值方法对研究区 ET_0及其对气象因子的敏感系数进行空间插值,分析 ET_0及其对气象因子的敏感系数空间分布特征。

3　结果与分析

3.1　毛乌素沙地参考作物蒸散量及气象因子时间变化趋势

3.1.1　年值变化趋势

由表 1 可知,毛乌素沙地 ET_0多年均值为 1048.81mm,ET_0最大值在定边站(1242.35mm,2006 年),最小值在横山站(851.64mm,1959 年),逐年变化率为 0.54 mm。Mann-Kendall 趋势检验结果表明,毛乌素沙地 ET_0呈缓慢上升趋势,其中,定边和鄂尔多斯站 ET_0上升趋势达到显著性水平;而鄂托克旗和伊金霍洛旗站多年 ET_0呈现显著下降趋势。

图 1 为近 60 年毛乌素沙地年 ET_0及主要气象因子的变化趋势。距平曲线显示多年 ET_0呈波动变化过程,ET_0在 1955—1968 年呈现下降趋势,1969—1975 年稍有上升,1976—1996 年呈现下降趋势,1997—2006 年逐渐上升,2007 年以后又呈现下降趋势。近 60 年内毛乌素沙地 ET_0的波动范围在 906.82—1142.37mm 之间,多年相对变化率为 3.11%,随时间呈现不显著增加趋势。相对湿度呈现不显著变化,多年平均值为 50.91%,多年相对变化率较小,为-0.71%。风速和日照时数随时间整体呈现显著降低趋势,多年平均值分别为 2.72m/s 和 7.94h,距平曲线显示 1983 年以后风速和日照时数年均值明显低于两者多年平均值,多年相对变化率分别为—17.62%和—6.05%。气温随时间呈现显著上升趋势,多年平均值为 7.75℃,多年相对变化率为 25.55%。

表 1　毛乌素沙地各站点 1955—2014 年参考作物年蒸散量特征值及变化趋势

Table 1　Characteristic value and variation of annual reference crop evapotranspiration in Mu Us desert during 1955—2014

参考作物蒸散量 Evapotranspiration	定边县	鄂尔多斯市	鄂托克旗	横山县	盐池县	伊金霍洛旗	榆林市	毛乌素沙地
平均值 Mean value/mm	1103.85	1043.44	1069.01	1043.89	1058.53	1050.84	1014.05	1048.81
最小值 Minimum value/mm	971.76	893.80	945.88	851.64	915.31	952.50	891.85	906.82
最大值 Maximum value/mm	1242.35	1187.72	1214.03	1214.86	1173.38	1167.67	1142.67	1142.37
变化率 Rate of change/mm	3.44*	0.81*	−1.22**	0.84	0.0048	−1.87**	0.84	0.54

*，**分别表示变化趋势通过了置信度 95%和 99%的显著性检验

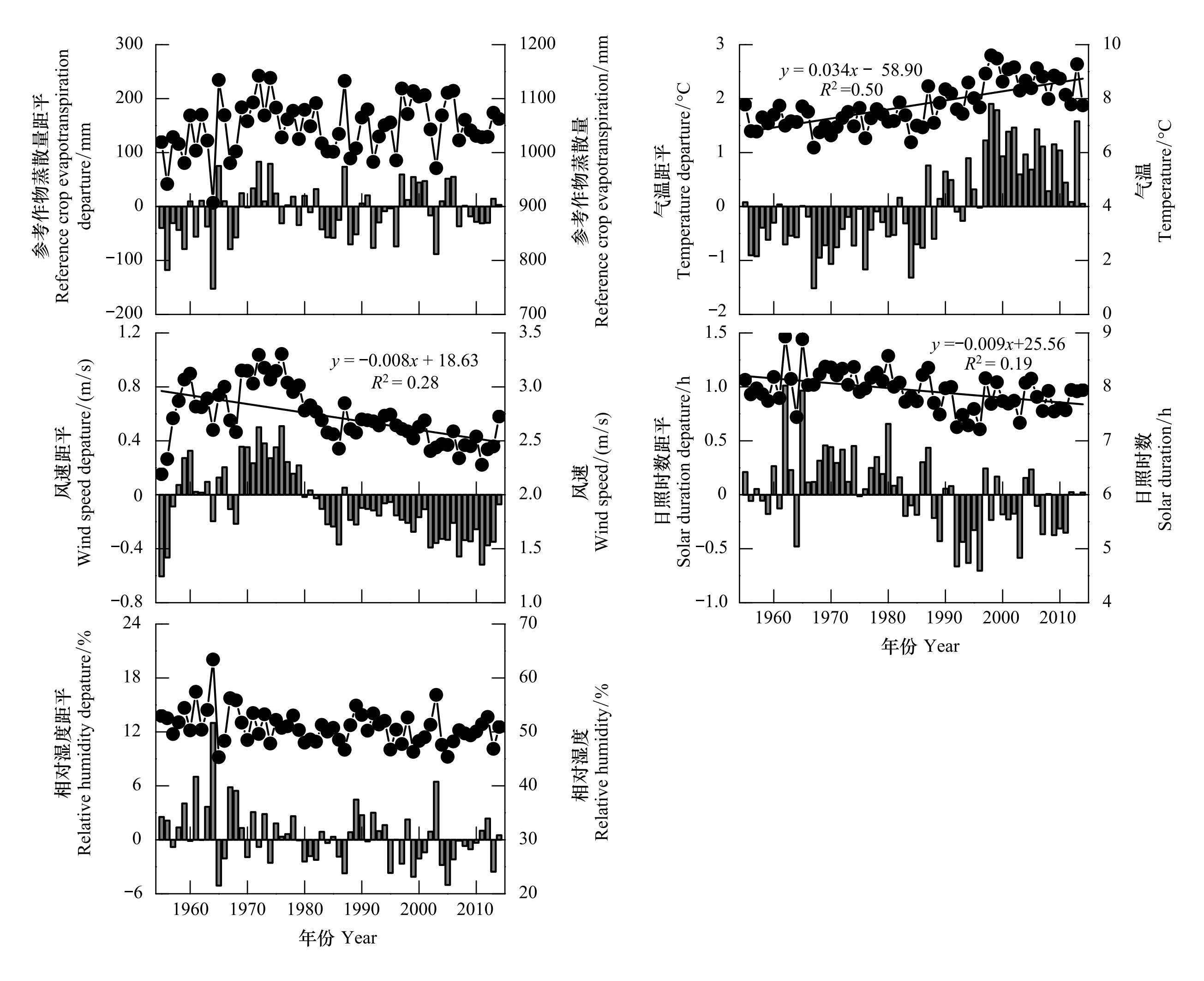


图 1　1955—2014 年毛乌素沙地参考作物蒸散量及气象因子年值变化趋势

Fig.1　Change trend of annual reference crop evapotranspiration and meteorological factors in Mu Us desert during 1955—2014

3.1.2　季节变化趋势

毛乌素沙地 ET_0及主要气象因子具有明显的季节动态变化特征(表 2)。ET_0夏季最高,多年平均值为 5.23 mm/d,冬季最低,为 0.70 mm/d。春、冬两季多年平均 ET_0呈现显著上升趋势,逐年变化率分别为 0.0036 mm/d 和 0.0019 mm/d,而夏、秋两季多年平均 ET_0变化不显著。风速春季最高,为 3.34m/s,冬季最低为 2.47m/s。相对湿度秋季最高为 57.08%,春季最低为 39.81%。气温和日照时数季节变化同 ET_0一致。Mann-

Kendall 趋势检验结果表明,四季风速均呈现显著下降趋势,气温呈现显著上升趋势。春、冬两季相对湿度呈现显著下降趋势。夏、秋、冬三季日照时数显著下降。

3.2　毛乌素沙地参考作物蒸散量的空间分布

从图 2 可以看出近 60 年毛乌素沙地平均 ET_0空间分布基本呈现自西向东递减,地区性差异明显,西部高蒸散量区(鄂托克旗、盐池县和定边县)ET_0变化范围为 1058.53—1103.85 mm,东部低蒸散量区(鄂尔多斯市、伊金霍洛旗、榆林市、横山县和靖边县)变化范围为 1014.05—1043.44 mm。不同季节 ET_0的空间分布与年 ET_0空间分布基本一致,呈现西部较高,东部较低。

表 2　1955—2014 年毛乌素沙地参考作物蒸散量及气象因子季节变化趋势

Table 2　Change trend of seasonal reference crop evapotranspiration and meteorological factors in Mu Us desert during 1955—2014

	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	平均值	变化率	平均值	变化率	平均值	变化率	平均值	变化率
参考作物蒸散量/(mm/d) Evapotranspiration	3.62	0.0036 *	5.23	−0.0016	2.00	0.00047	0.70	0.0019 **
平均风速/(m/s) Mean wind speed	3.34	−0.012 **	2.83	−0.0058 **	2.48	−0.0061 **	2.47	−0.010 **
平均气温/℃ Mean temperature	9.28	0.033 **	21.34	0.019 **	7.71	0.035 **	−7.28	0.055 **
平均相对湿度/% Mean relative humidity	39.81	−0.086 *	55.63	−0.038	57.08	−0.018	50.65	−0.071 *
日照时数 Solar duration/h	8.40	0.00039	8.81	−0.013 **	7.47	−0.011 **	6.92	−0.012 **

*,** 分别表示变化趋势通过了置信度 95%和 99%的显著性检验

3.3　参考作物蒸散量与气象因子的敏感性分析

3.3.1　参考作物蒸散量对气象因子的敏感系数

由表 3 可知,ET_0年变化对风速、气温和日照时数的敏感系数为正值,这说明其他气象因子不变的条件下,ET_0将随着以上气象因子的升高而增加,而 ET_0对相对湿度的敏感系数为负值,表明相对湿度的升高将抑制 ET_0增加。通过比较敏感系数绝对值可知,ET_0变化对各气象因子的敏感程度依次为风速>日照时数>气温>相对湿度。

不同季节 ET_0变化对气象因子的敏感性与全年有所差异。春、秋两季 ET_0变化对日照时数最为敏感,其次为相对湿度。夏、冬两季 ET_0变化对相对湿度最为敏感,其次为平均风速。

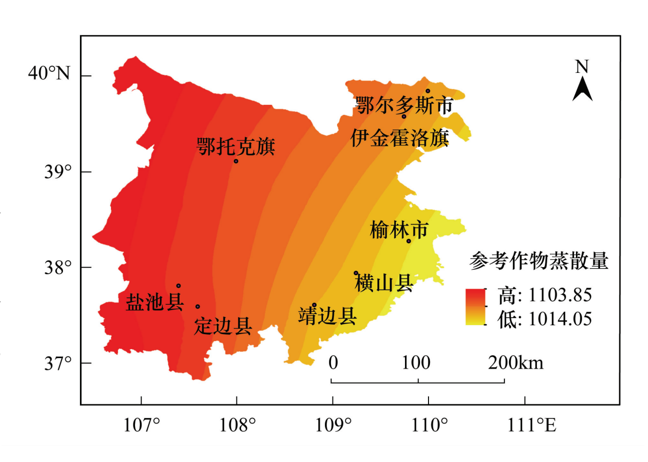


图 2　毛乌素沙地参考作物蒸散量空间分布

Fig.2　Spatial distribution of reference crop evapotranspiration in Mu Us desert

表 3　毛乌素沙地不同季节气象因子敏感系数

Table 3　Change trend of seasonal sensitivity coefficients for meteorological variable in Mu Us desert

季节 Seasons	平均风速 Mean wind speed	平均气温 Mean temperature	平均相对湿度 Mean relative humidity	日照时数 Solar duration
春季	0.25	0.27	−0.43	0.93
夏季	0.77	0.62	−0.82	0.39
秋季	0.37	0.37	−0.71	0.81
冬季	0.79	0.63	−0.95	0.44
全年 Annual	0.69	0.68	−0.62	0.68

毛乌素沙地 ET_0对气象因子的敏感性存在区域差异。如图 3 所示,整个区域内,ET_0对风速、气温和日照时数的敏感系数均为正值,而对相对湿度的敏感系数为负值。空间分布上,风速和气温敏感系数的低值区分布在毛乌素沙地的西北部地区,同时该地区也是相对湿度和日照时数敏感系数的高值区,这说明该地区 ET_0的变化对风速、气温和相对湿度敏感程度小,而对日照时数的敏感程度大。风速敏感系数的高值区和相对湿度的低值区同时分布于毛乌素南部地区。气温敏感系数高值区位于毛乌素沙地的东南部地区,日照时数敏感系数的低值区分布于毛乌素沙地的西南部。

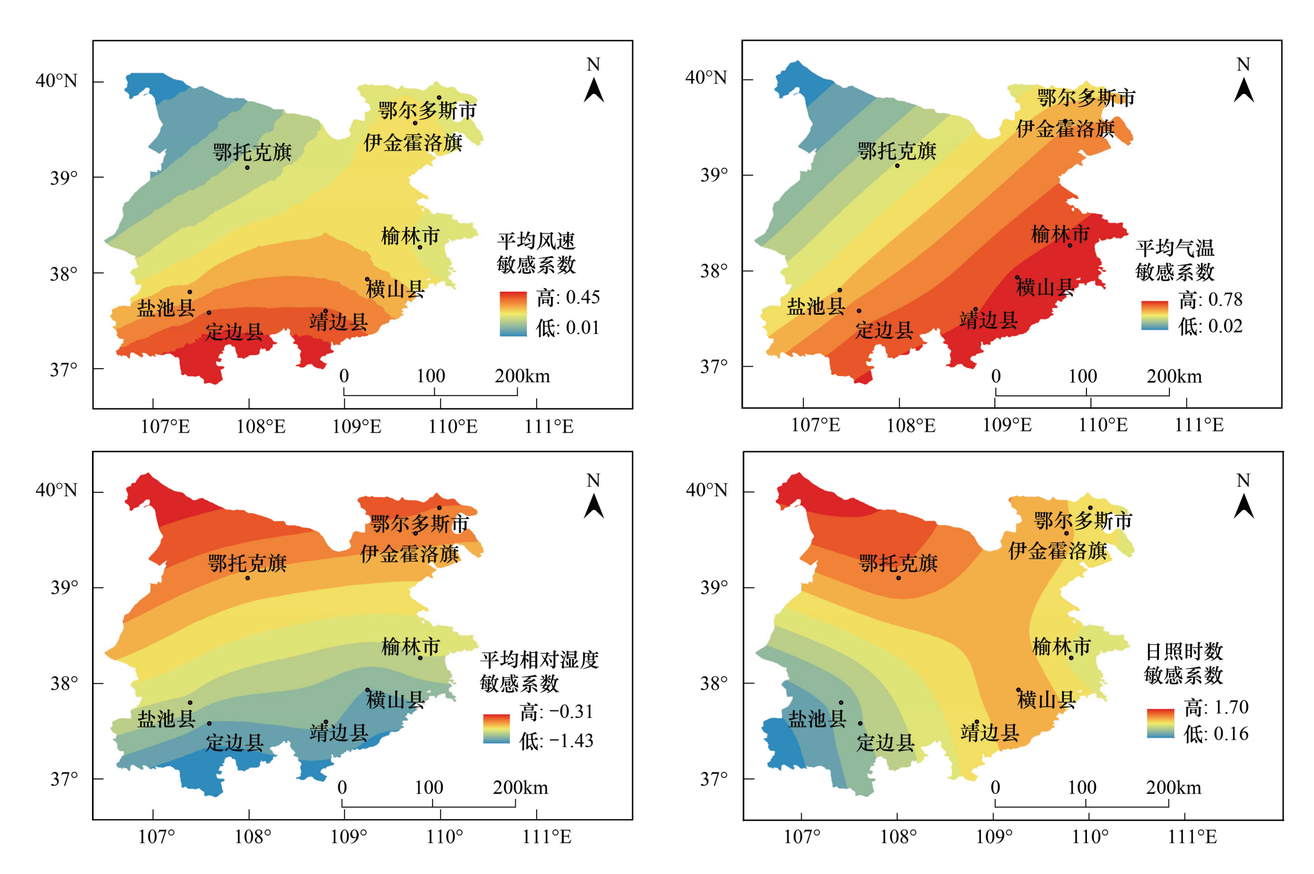


图 3 毛乌素沙地各气象因子敏感系数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of sensitivity coefficients for each meteorological variable in Mu Us desert

3.3.2 参考作物蒸散量变化的主导因子

自然条件下,气象因子对 ET_0的影响是相互联系又相互制约的共同决定结果,气象因子对 ET_0变化的贡献量能够定量化分析单个气象因子对 ET_0的影响,ET_0变化的主导因子即贡献量最大的气象因子。气温对 ET_0年变化的贡献量最大,为 17.37%,是毛乌素沙地 ET_0变化的主导因子,其次为风速(-12.15%)、日照时数(-5.11%)和相对湿度(0.44%),由此得出,近 60 年气温的显著升高引起 ET_0的增加,而风速和日照时数的显著下降导致 ET_0减少。

由于不同季节的气候特征不同,ET_0变化的主导因子随季节的变化发生改变。夏季风速对 ET_0的贡献量最大,为-8.34%;春、秋、冬三季气温对 ET_0的贡献量最大,分别为 5.77%、10.15%和 27.70%。由此可知,春、冬两季 ET_0的显著增加归因于气温的显著上升;而夏、秋两季 ET_0变化不显著,是由于风速和日照时数的显著下降,其对 ET_0变化的负贡献量与气温上升的正贡献量相抵消。

空间分布上,ET_0变化的主导因子存在区域差异,不同区域内气温和风速对 ET_0变化的贡献量均较大,其次是日照时数,而相对湿度的贡献量最小。气温作为主导因子影响 ET_0变化的主要区域集中在毛乌素沙地东部的鄂尔多斯市、榆林市和横山县,以及西北部地区的鄂托克旗,风速作为主导因子影响 ET_0变化的主要区域

集中在毛乌素沙地西南部的定边县和盐池县,以及东南部的伊金霍洛旗。由于气象因子的多年相对变化率与敏感系数共同决定贡献量的大小,所以影响 ET_0变化主导因子的空间分布与敏感系数分布有所差异。

4　讨论

由于研究区域及时间段不同,西北地区 ET_0变化对气象因子的响应程度存在区域差异。已有研究表明,内蒙古额济纳绿洲 ET_0变化对太阳辐射敏感程度最高[32],黄土高原地区 ET_0变化与气温和日照时数极显著相关[33],而石羊河流域 ET_0变化与相对湿度相关性最好[34]。本文基于最新年代气象数据计算敏感系数得出,毛乌素沙地 ET_0变化对相对湿度敏感程度最高。虽然敏感系数可以反映 ET_0对气象因子变化的敏感程度,但是不能衡量单个气象因子对 ET_0变化的实际贡献水平,即定量的评价各气象因子对 ET_0的影响大小。本文通过计算气象因子对 ET_0年变化的贡献量,得到气温和相对湿度对毛乌素沙地 ET_0变化具有正贡献作用,风速和日照时数对 ET_0变化具有负贡献作用;气温是 ET_0变化的主导因子,其次是风速,这与曹雯等[35]基于 1961—2009 年气象资料分析西北干旱半干旱区结果一致。1955—2014 年毛乌素沙地风速和日照时数呈现的降低趋势抑制了 ET_0增加,但是对 ET_0变化贡献量较高的气温呈现显著上升趋势,气温对 ET_0增加的促进作用略大于风速和日照时数的抑制作用,相对湿度的相对变化率较小导致其对 ET_0增加的贡献率不大,因此,毛乌素沙地 ET_0整体呈现不显著上升趋势。

空间上,由于气象因子对 ET_0变化的贡献量及气候特征存在区域差异,毛乌素沙地 ET_0空间分布不均匀,总体呈现自西向东递减趋势,加之毛乌素沙地地形由西北向东南部倾斜,这将加重毛乌素沙地西北部地区的水资源短缺压力和干旱程度。

由于毛乌素沙地区域内气象站点有限,本文基于可获取的典型气象站点数据代表该区域气象特征,将气象因子作为主导因子分析 ET_0的时空变化特征,但在干旱半干旱地区,由风速、气温和相对湿度变异引起的平流、大气环流年际变化、下垫面的均一性以及人类活动均影响 ET_0的变化,可是这些因素尚不能定量化计算分析,因此,本文研究结果存在一定程度的局限性。参考作物蒸散量作为实际蒸散量的理论上限,是衡量实际蒸散量的重要参考,由于干旱半干旱地区受到严重水分限制,开展该地区实际蒸散量和参考作物蒸散量的对比分析,能够进一步深入和完善干旱半干旱地区的水循环研究。

5　结论

(1)近 60 年毛乌素沙地 ET_0整体呈现缓慢上升趋势,多年平均值为 1048.81mm;ET_0年内变化夏季最高,多年平均值为 5.23 mm/d,冬季最低,为 0.70 mm/d。毛乌素沙地 ET_0空间分布整体呈现自西向东递减趋势。

(2)各气象因子对 ET_0的敏感性分析中,ET_0对风速、气温和日照时数为正敏感,对相对湿度为负敏感。ET_0变化对各气象因子的敏感程度依次为风速>日照时数>气温>相对湿度。春、秋两季 ET_0变化对日照时数敏感程度最高,夏、冬两季 ET_0变化对相对湿度敏感程度最高。空间分布上,毛乌素沙地东南部地区为气温敏感系数高值区,西北部地区为相对湿度和日照时数敏感系数高值区,南部为风速敏感系数高值区。

(3)气温是影响毛乌素沙地 ET_0年变化的主导因子,其次是风速、日照时数和相对湿度。近 60 年气温的显著升高引起 ET_0的增加,而风速和日照时数的显著下降导致 ET_0减少。夏季 ET_0变化的主导因子是风速;春、秋、冬三季主导因子是气温。空间分布上,毛乌素沙地西南部地区 ET_0变化的主导因子为风速,东部地区主导因子为气温。影响 ET_0变化主导因子的空间分布与敏感系数分布有所差异。

参考文献(References):

[1]　Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.

[2]　毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较. 应用气象学报, 2000, 11(S1): 128-136.

[3]　杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 王西琴, 刘昌明. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2003: 67-71.

[4] Xu C Y, Singh V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions. Journal of Hydrology, 2005, 308(1/4): 105-121.

[5] 罗玲, 王宗明, 毛德华, 娄艳景, 任春颖, 宋开山. 松嫩平原西部草地净初级生产力对气候变化及人类活动的响应. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1533-1540.

[6] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(1): 55-73.

[7] Espadafor M, Lorite I J, Gavilán P, Berengena J. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 1045-1061.

[8] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. International Journal of Climatology, 2004, 24(9): 1077-1090.

[9] Eslamian S, Khordadi M J, Abedi-Koupai J. Effects of variations in climatic parameters on evapotranspiration in the arid and semi-arid regions. Global and Planetary Change, 2011, 78(3/4): 188-194.

[10] Nandagiri L, Kovoor G M. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(3): 238-249.

[11] Dinpashoh Y, Jhajharia D, Fakheri-Fard A, Singh V P, Kahya E. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. Journal of Hydrology, 2011, 399(3/4): 422-533.

[12] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 陈峪, 廖要明. 1956—2000年中国潜在蒸散量变化趋势. 地理研究, 2006, 25(3): 378-387.

[13] 尹云鹤, 吴绍洪, 郑度, 杨勤业. 近30年我国干湿状况变化的区域差异. 科学通报, 2005, 50(15): 1636-1642.

[14] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588.

[15] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 王宗明, 杜嘉. 近60年来东北地区参考作物蒸散量时空变化. 水科学进展, 2010, 21(2): 194-200.

[16] 梁丽乔, 闫敏华, 邓伟, 李丽娟. 松嫩平原西部参考作物蒸散量变化过程. 地理科学进展, 2006, 25(3): 22-31.

[17] 李林, 张国胜, 汪青春, 时兴合. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究. 地球科学进展, 2000, 15(3): 256-259.

[18] 普宗朝, 张山清, 李景林, 黄新, 孙月琴, 阿帕尔. 乌鲁木齐河流域参考作物蒸散量时空变化特征. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(1): 41-55.

[19] 孙小舟, 封志明, 杨艳昭. 西辽河流域1952年—2007年参考作物蒸散量的变化趋势. 资源科学, 2009, 31(3): 479-584.

[20] 王小静, 李志, 赵姹, 张志强. 西北旱区1961—2011年参考作物蒸散量的时空分异. 生态学报, 2014, 34(19): 5609-5616.

[21] 黄会平, 曹明明, 宋进喜, 韩宇平, 陈姗姗. 1957—2012年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析. 自然资源学报, 2015, 30(2): 315-326.

[22] 段春锋, 缪启龙, 曹雯. 西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素. 农业工程学报, 2011, 27(8): 77-83.

[23] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 刘宪锋. 华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析. 生态学报, 2014, 34(19): 5589-5599.

[24] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 刘利文. 川中丘陵区参考作物蒸发蒸腾量近60年变化成因研究. 水利学报, 2013, 44(2): 183-190.

[25] 房世波, 许端阳, 张新时. 毛乌素沙地沙漠化过程及其气候因子驱动分析. 中国沙漠, 2009, 29(5): 796-801.

[26] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1-16.

[27] 杨振常, 李玉霖, 崔夺, 陈静, 赵学勇. 半干旱典型沙区1951—2005年主要气象要素及潜在蒸散量的变化趋势研究. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1384-1392.

[28] 贾科利, 张俊华, 郭占军. 毛乌素沙地、腾格里沙漠南缘带土地利用与气候变化关系研究——以宁夏中部为例. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2011, 32(2): 176-180.

[29] Yin Y, Wu S, Zheng D, Yang Q. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. Agricultural Water Management, 2008, 95(1): 77-84.

[30] McCuen R H. A sensitivity and error analysis CF procedures used for estimating evaporation. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1974, 10(3): 486-597.

[31] Yin Y H, Wu S H, Dai E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971-2008. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(29): 3329-3337.

[32] 侯兰功, 肖洪浪, 邹松兵, 杨永刚. 额济纳绿洲生长季参考作物蒸散发敏感性分析. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1255-1259.

[33] 王幼奇, 樊军, 邵明安, 白一茹. 黄土高原地区近50年参考作物蒸散量变化特征. 农业工程学报, 2008, 24(9): 6-10.

[34] 佟玲, 康绍忠, 粟晓玲. 石羊河流域气候变化对参考作物蒸发蒸腾量的影响. 农业工程学报, 2004, 20(2): 15-18.

[35] 曹雯, 申双和, 段春锋. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因. 生态学报, 2012, 32(11): 3394-3403.